

Albert Einstein, 1905. La revolución en la Física

J. ROBERTO SOTO G.*



Habitación de Einstein en Berna donde elaboró la teoría de la relatividad

Resumen

A finales del siglo XIX existían elementos que permitían comprender la dimensión de la crisis que socavaba los fundamentos de la física. En esta reseña se intenta mostrar cómo en medio de los enormes avances de la electrodinámica había contradicciones fundamentales que a su vez se convirtieron en el motor de las ideas revolucionarias que destronarían la hegemonía concepción newtoniana del espacio y el tiempo.

Palabras clave: Electrodinámica. Éter. Teoría especial de la relatividad.

Abstract

By the end 19th century, some facts provided strong evidence of the dimension of the crisis that was undermining the foundations of physics.

This paper shows how the enormous advances in the electrodynamics raised fundamental contradictions that sparked new, revolutionary ideas which eventually finished with the hegemony of the newtonian conception of space and time.

Key words: Electrodynamics. Ether. Special theory of relativity.

* M.Sc Físico. Departamento de Física UAO. Grupo de Investigación en Mecánica de fluidos reconocido por Colciencias. jrsoto@uao.edu.co

Introducción

El año 2005 fue declarado por Naciones Unidas como el año mundial de la física, reconociendo así la importancia de esta ciencia en el desarrollo tecnológico y en la comprensión de la naturaleza. En este marco se celebra el centenario de la teoría especial de la relatividad.

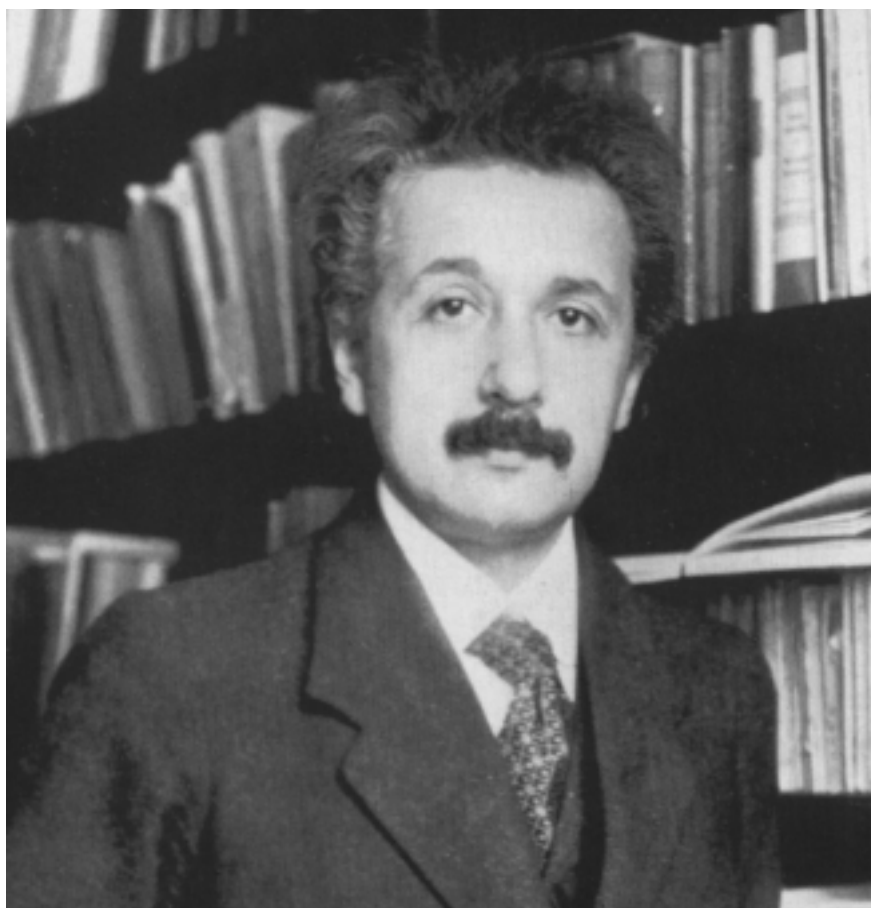
El presente material reseña momentos, personas e ideas que contribuyeron de manera relevante a las discusiones que caracterizaron la crisis de la física en los albores del siglo XX. La aplicación e interpretación de las leyes de Maxwell evidenciaron fisuras en las concepciones físicas de Newton.

Electromagnetismo y óptica

Cuando James Clerk Maxwell (1831-1879) falleció, su teoría electromagnética no gozaba de plena aceptación. Al parecer la llamada corriente de desplazamiento introducida por él para garantizar la continuidad fue uno de los mayores obstáculos para su reconocimiento.

Al introducir la corriente de desplazamiento una asombrosa simetría se evidenciaba en sus ecuaciones, los términos correspondientes a la electricidad y al magnetismo aparecían en formas casi idénticas. Fue a partir de dicha simetría que Maxwell concluyó la existencia de ondas electromagnéticas transversales.

La velocidad de las hipotéticas ondas podía ser calculada a partir de las mismas ecuaciones, al establecer una relación de la fuerza entre cargas en reposo y la fuerza entre corrientes. La relación en cuestión ya había sido medida y dentro del margen de error experimental resultó igual a la velocidad de la luz. Dado que el experimento no tenía nada que ver con la luz visible, el resultado pareció coincidencial. Refiriéndose a esa experiencia Maxwell señaló que: «la única uti-



Albert Einstein en 1916

lización que se ha hecho de la luz ha sido para ver los instrumentos».

Maxwell tenía el firme convencimiento del origen electromagnético de la luz. Pero debieron transcurrir nueve años más, después de su muerte, para alcanzar la confirmación y aceptación plena de su teoría. Para entonces Heinrich Hertz logró generar ondas electromagnéticas que demostraban las predicciones de Maxwell. El carácter unificador de sus ecuaciones mostró la electricidad, el magnetismo y la óptica como facetas de una misma entidad. La luz se convirtió entonces en una manifestación del electromagnetismo.

El proceso de unificación de la electricidad y el magnetismo fue largo y complejo. Los trabajos matemáticos de Ampère, así como la extensa y sólida información experimental de Faraday, entre otros, constituyeron los pilares sobre los que Maxwell desarrolló su programa unificador.



Henri Poincaré (1854-1912) se anticipó a la teoría de la relatividad restringida de Einstein en varios aspectos

Maxwell suponía que los fenómenos eléctricos y magnéticos transcurrían en el éter. Para obtener las ecuaciones construyó un ingenioso modelo mecánico de éter, estrafalario según Hoffmann, que le permitió obtener las ecuaciones del campo electromagnético que explicaban con gran detalle, entre otros, los resultados de Ampère y Faraday.

Aunque el éter del electromagnetismo no era el mismo de Newton, la influencia de este último jugaba papel determinante en la concepción del mundo físico. Se consideraba que la Tierra, al moverse en ese medio, provisto de sutiles y contradictorias propiedades, provocaría un «viento» que afectaría la velocidad de la luz.

Maxwell explicó al astrónomo D. P. Todd en una carta, que aunque teóricamente el movimiento de traslación de la Tierra influía sobre la velocidad de la luz medida en el laboratorio, el efecto era demasiado pequeño como para ser observado. Luego de la muerte de Maxwell, Todd, comprendiendo la importancia histórica de dicha comunicación, la envió a la Royal Society en Londres que la hizo pública en sus *Proceedings*.

El físico norteamericano de origen alemán Albert Michelson (1852-1931), consideró factible detectar por métodos ópticos el viento de éter y se dispuso a medir el efecto en cuestión, diseñando para ello un dispositivo de alta sensibilidad conocido hoy en día como el interferómetro de Michelson. Para 1881, Michelson había realizado ya su experimento sin lograr detectar el efecto previsto teóricamente. En 1887, en colaboración con Edward Morley (1838-1923), efectuó nuevas mediciones con una versión mejorada de su interferómetro, de mayor sensibilidad y precisión. Sin embargo, el resultado fue el mismo: no se presentó en el interferómetro

ningún efecto derivado del movimiento de la Tierra.

El experimento de Michelson-Morley representó un enorme fracaso que a su vez afectaba la aceptada interpretación del fenómeno conocido como la aberración de la luz. Se denomina así al fenómeno por el cual la posición de las estrellas aparece desplazada con respecto a su posición real. Este desplazamiento es el resultado de movimientos como la rotación de la Tierra, su revolución orbital alrededor del Sol y el movimiento del sistema solar a través del espacio. Aunque la velocidad resultante del observador es pequeña (sólo un 0,2% de la velocidad de la luz), es suficiente para producir un aparente desplazamiento de los rayos de luz que proceden de un objeto celeste.

Para entonces, la aberración de la luz, según Fresnel, se explicaba postulando que el éter podía fluir libremente a través de los cuerpos, lo que implicaba necesariamente la existencia del «viento de éter» cuando un cuerpo se mueve en él.

En 1902, convencido de su fracaso, Michelson se expresó así sobre su experimento: «El experimento es históricamente interesante para mí, puesto que fue para resolver este problema (el del movimiento a través del éter) que fue inventado el interferómetro. Creo que se admitirá que el problema, al conducir a la invención del interferómetro, compensó con creces el hecho de que el experimento diera un resultado negativo».

En un esfuerzo por conciliar la existencia del éter con el resultado negativo del experimento de Michelson, el holandés Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), considerando al éter completamente inmóvil, propuso una contracción de los cuerpos¹ en la dirección de su movimiento.

¹ Al parecer fue el irlandés FitzGerald quien recurrió originalmente a esta idea. En la literatura contemporánea, esta suposición se conoce como la contracción de FitzGerald-Lorentz.

El matemático francés Henri Poincaré (1854-1912) criticó los intentos de justificar los resultados nulos de los experimentos² que buscaban encontrar los efectos del «viento de éter». Poincaré expresó abiertamente su disgusto frente a la suposición ad hoc de Lorentz, considerándola una forma de hacer remiendos.

En 1890, el ilustre William Thomson declaró públicamente que la física prácticamente había desentrañado los misterios de la naturaleza, quedando pendientes por resolver dos «pequeñas nubes».³ Se refería así al problema de radiación del cuerpo negro y al resultado negativo del experimento de Michelson. Esta especie de optimismo de final de siglo no era del todo extraña; algunos físicos compartían esa percepción.

La revolución llega en los primeros años del siglo xx

En 1900, Max Planck se aventuró a explicar el problema de la radiación del cuerpo negro. Su explicación, sin duda alguna, revolucionaría el modelo de absorción y emisión de energía al introducir el cuántum de energía. Su propuesta invalidando el clásico teorema de la equipartición de la energía, resolvía la contradicción existente entre la explicación clásica y los resultados experimentales, conocida como la catástrofe ultravioleta. Sin embargo, la nueva explicación no contó con la mejor recepción y debieron transcurrir algunos años antes de ser aceptada.

Las pequeñas nubes a las que se refirió Thomson fueron realmente los detonantes de las dos más grandes revoluciones de la física en el siglo xx. La crisis que afrontaba

la física fue en aquel momento caracterizada por Poincaré,⁴ como una crisis de los principios de la física. En 1904, considerando las ecuaciones del electromagnetismo advirtió sobre la necesidad de cambios en la teoría de Newton.

Las ecuaciones de Maxwell, válidas en un marco de referencia en reposo, no lo son en un segundo marco de referencia que se mueve uniformemente respecto al primero, cuando son sometidas a las transformaciones de Galileo. Se contradice así el principio clásico de la relatividad galileana, según



Albert Einstein

² Para 1904 se habían desarrollado otros experimentos diferentes al de Michelson.

³ Esta fue al parecer la forma en que Thomson se refirió al problema. The Concious Universe. Nadeau Robert and Kafatos, Menas. 1990

⁴ El Valor de la Ciencia. Poincaré Henri Capítulo VIII. Pág. 273 Editorial Nauka (en ruso)



Conrad Habicht, Maurice Solovine y Albert Einstein en una fotografía en recuerdo de la Academia Olímpica

el cuál no es posible distinguir entre un sistema en reposo relativo y otro con movimiento rectilíneo uniforme.

En 1904, Lorentz publicó el artículo «Fenómenos electromagnéticos en un sistema que se mueve con una velocidad cualquiera menor que la de la luz». Sus desarrollos matemáticos lo condujeron a la construcción de unas transformaciones de coordenadas que permitían pasar de un marco de referencia en reposo a otro que se mueve con velocidad constante respecto al primero. De ellas se deduce la contracción de la longitud de un objeto en el sentido del movimiento y se introduce además el tiempo local. Aunque fue Lorentz quien perfeccionó matemáticamente la teoría de Maxwell, dando a las ecuaciones del campo electromagnético su actual forma, un error no le permitió, entonces, conservar la forma de las ecuaciones de Maxwell durante la transformación de coordenadas. En 1905 Poincaré corrige y le da forma final al trabajo de Lorentz.

Durante 1905, la revista alemana *Annalen der Physik* publicó una serie de artículos de Albert Einstein,

un joven desconocido de 26 años, físico de profesión que por aquel entonces se desempeñaba como empleado de la oficina de patentes en Berna.

El 17 de marzo se publicó el artículo «sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz», fue el primero de los cinco que aparecieron ese año. En él, Einstein explica el efecto fotoeléctrico. El término heurístico no era de uso común en la física de aquel entonces, en filosofía y educación significaba algo útil para descubrir y explicar.

El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por una superficie metálica bajo la acción de la luz. Paradójicamente, el efecto había sido descubierto por Hertz, cuando buscaba confirmar experimentalmente las predicciones de Maxwell, referentes al carácter ondulatorio de la luz. Sin embargo, no era precisamente la teoría de Maxwell la que podía explicar el efecto dado que al aplicar el modelo ondulatorio de la luz la evidencia experimental no coincidía con las predicciones teóricas.⁵

Así lo expresa Einstein en la introducción de su artículo cuando afirma que «*La teoría ondulatoria de la luz, que opera con funciones espaciales continuas, se ha mostrado soberbia para describir fenómenos puramente ópticos y probablemente nunca será reemplazada por otra teoría. Deberíamos tener en cuenta, sin embargo, que las observaciones ópticas se refieren a promedios temporales antes que a valores instantáneos; y es perfectamente concebible, pese a la completa confirmación experimental de la teoría de la difracción, reflexión, refracción, dispersión, etc, que la teoría de la luz, que opera con funciones espaciales continuas, lleve a*

5 Conceptos de Relatividad y Física Cuántica. Robert Resnick. Limusa 1986.

contradicciones cuando se aplique a los fenómenos de emisión y transformación de la luz».

En este artículo Einstein se refirió especialmente al trabajo de Planck sobre la radiación del cuerpo negro.⁶ Basado en el cuántum de luz, analiza tres interacciones de la luz con la sustancia: La regla de Stokes para la fluorescencia; la ionización de gases por luz ultravioleta y el efecto fotoeléctrico.

Tal como había sucedido con Planck, la propuesta del cuántum de luz no fue bien recibida, el cuántum de energía había permanecido en la sombra desde 1900 y al parecer sólo Einstein se lo había tomado en serio. Los historiadores señalan que, inclusive, el mismo Planck expresó sus reservas respecto a la extensión del concepto de cuántum al caso de la luz.⁷

La explicación de Einstein que renunciaba a la representación ondulatoria de la luz tiene, para la física en ese momento histórico, un profundo significado revolucionario. Mientras que para Planck, en 1900, los cuantos de energía habían sido sólo un recurso útil para explicar la radiación del cuerpo negro, para Einstein, en cambio, eran una realidad objetiva.

Robert Millikan (1868-1953), el físico que determinó experimentalmente la carga del electrón, dedicó más de diez años al estudio del efecto fotoeléctrico sin aceptar la explicación de Einstein. En 1916, al hacer públicos los resultados de sus experimentos, reconocía que no obstante la exactitud con la que la ecuación fotoeléctrica pronosticaba los resultados observados, él consideraba que la teoría de Einstein era insostenible.⁸



A pesar de sus pocos partidarios, en 1921 a Albert Einstein le fue otorgado el Premio Nobel de Física por sus servicios a la física teórica y en especial por su descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico.

Las relaciones entre Einstein y Lorentz fueron más allá de la simple colaboración científica

El 30 de junio de 1905, se publica el cuarto artículo «Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento». Einstein establece dos conjeturas que él mismo eleva al rango de postulados y a partir de ellos construye lo que hoy conoce-

6 Según Kuhn, «Einstein se refirió a la ley de Planck sólo por ser la mejor fórmula experimental que existía a la sazón y sólo la utilizó para altas frecuencias». Thomas Kuhn. La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica, 1894-1912. Alianza Universidad 1987

7 Einstein. Banesh Hoffmann. Salvat 1985

8 I. Bernard Cohen. Revolución en la ciencia. Gedisa 1989



Arthur Stanley Eddington (1882-1944) y Einstein en 1930. Eddington había verificado experimentalmente la desviación de la luz por los objetos de gran masa, predicha teóricamente por Einstein

mos como teoría especial (restringida) de la relatividad.

La primera conjetura, denominada «Principio de Relatividad» extiende la validez de las leyes de la electrodinámica a los marcos de referencia en los que se cumplen las leyes de la mecánica. Esto significa que las leyes de la física deben ser válidas en todos los marcos inerciales de referencia. En su momento esta fue una valiente extensión del principio de Galileo.

La segunda conjetura, que es según el propio Einstein «aparentemente incompatible con la primera», establece que la velocidad de la luz no depende del estado de movimiento del cuerpo emisor.

En la introducción del artículo señala además que: «se probará que la introducción de un *éter luminoso* es superflua, en tanto que el punto de vista desarrollado aquí no requerirá un espacio absoluto estacionario dotado de propiedades especiales, ni asignar un vector-velocidad a un punto del vacío en el que los

procesos electromagnéticos tienen lugar».⁹

Einstein se apoya en la concepción ondulatoria de la luz derivada de las ecuaciones de Maxwell. Lo que resulta curioso, si se tiene en cuenta que sólo unas semanas atrás, había explicado el efecto fotoeléctrico con ayuda de un modelo corpuscular.¹⁰

Su renuncia al éter considerándolo superfluo es explícita. Niega así de manera definitiva la existencia de esa sustancia que durante más de trescientos años había servido para dar cuenta tanto de la acción a distancia como de algunos fenómenos extramecánicos como la electricidad y el magnetismo, entre otros.¹¹

En palabras de Hoffmann, colaborador de Einstein en Princeton, «lo más hermoso del par de principios elegidos por Einstein es que cada uno por separado parece inocuo; y, sin embargo, juntos forman una mezcla explosiva, destinada a sacudir la propia base de la ciencia».¹²

Las consecuencias derivadas de los postulados efectivamente estremecieron los fundamentos mismos de la física de Newton, el espacio y el tiempo no son absolutos. Einstein había obtenido unas transformaciones de coordenadas (entre observadores inerciales) que coincidieron con las que Lorentz construyó para explicar su contracción.

El concepto clásico de simultaneidad pierde sentido. La duración de un fenómeno tiene sentido únicamente cuando la medición de dicho intervalo se asocia a un observador en un determinado marco de referencia. Dos eventos que son si-

9 Traducción de Gustavo A. Ponce

10 Nos podemos preguntar si entonces a esa altura ya se intuía la dualidad de la luz.

11 Los fundamentos metafísicos de la ciencia moderna. Edwin Artur Burtt.

12 La relatividad y sus orígenes. Banesh Hoffmann. Editorial labor 1985

multáneos en un sistema de coordenadas pueden no serlo en otro.

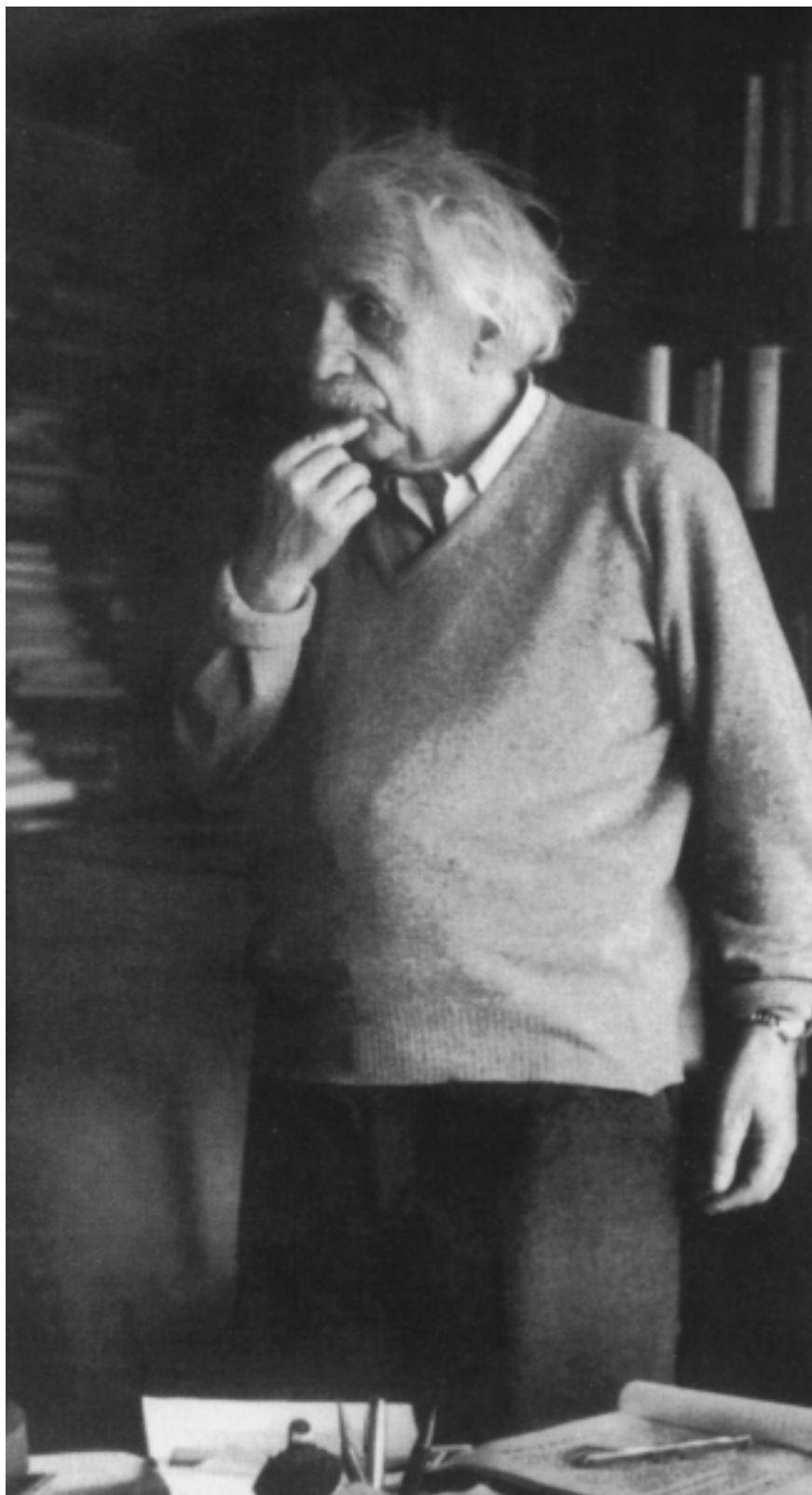
El carácter relativo de la simultaneidad es el verdadero eje de la teoría especial y como consecuencia inmediata emerge la relatividad de la distancia entre dos puntos del espacio. En la teoría de Einstein, los conceptos de tiempo y distancia son relativos. La noción newtoniana de tiempo y el espacio absolutos perdieron sentido.

De la teoría especial se derivan aún más resultados sorprendentes: La suma galileana de velocidades no se cumple, la suma de velocidades debe ahora realizarse a partir de las transformaciones de Lorentz y, como es de esperar, la velocidad de la luz no depende del observador. Esto significa que la velocidad de la luz es un invariante físico.

En el quinto artículo¹³ aparecido el 27 de septiembre, Einstein da continuidad a la aplicación del principio de relatividad, al encontrar que la masa de un cuerpo depende de su velocidad. Energía y masa son aspectos de una misma realidad.

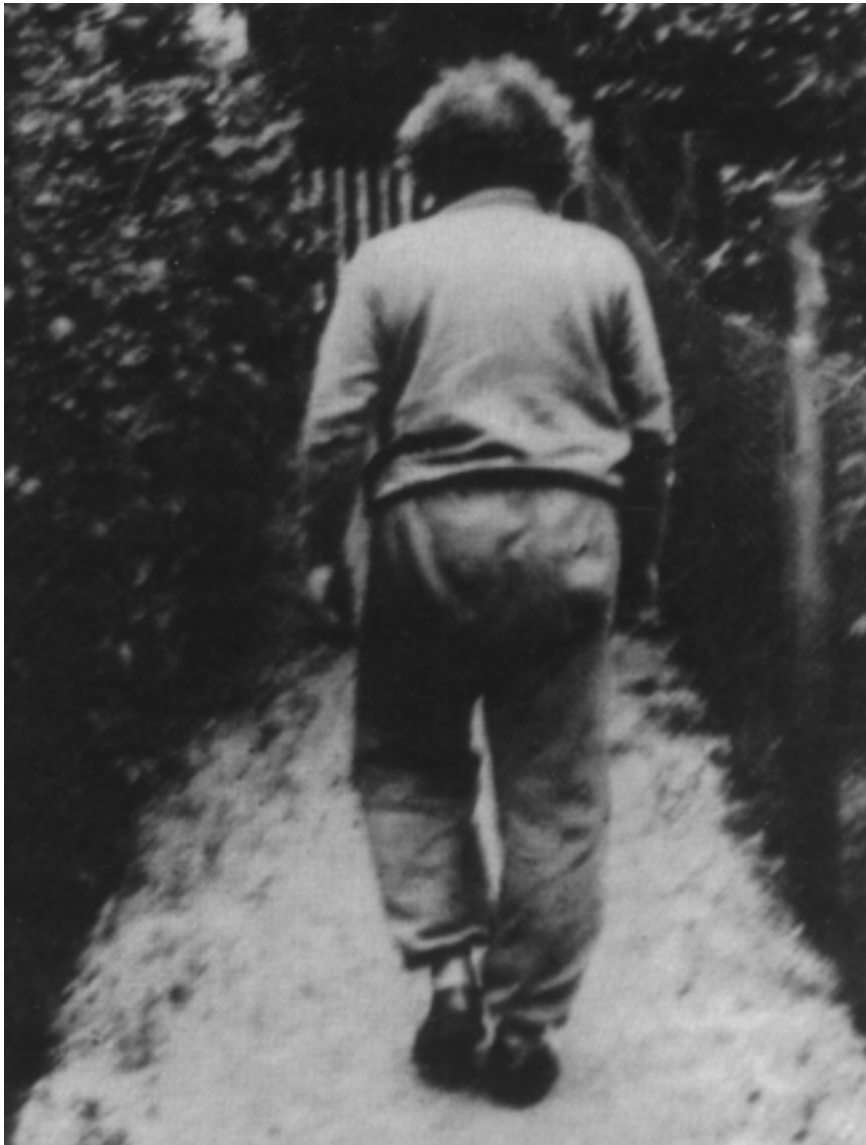
Tras establecer la relación entre masa y energía, Einstein en un artículo expositivo publicado en 1907, obtiene la famosa ecuación $E = m c^2$. Del concepto de masa en reposo se concluye, entonces, que cada gramo de sustancia contiene una inmensa cantidad de energía. Naturalmente, en ese momento la predicción fue especulativa y exótica. Fue confirmada años más tarde.

De la teoría especial de la relatividad se concluye entonces que la energía tiene masa y que la masa tiene energía. Este resultado conduce a la reformulación de importantes principios: «El descubrimiento de la inercia de la energía reveló a la masa como forma ultraconden-



Einstein hacia 1952, escribió en la introducción a una biografía que le había consagrado su yerno Rudolf Kayser: "lo que quizá se haya pasado por alto es la irracionalidad e incoherencia, el capricho, hasta diría que la sin razón, que la naturaleza, en su actividad inacabable, y al parecer para su divertimento, implanta en cada individuo. Pero estos elementos sólo los puede discernir el individuo en el crisol de su espíritu".

¹³ ¿Depende la inercia de un cuerpo de su contenido de energía?



Einstein el paseante solitario

sada de la energía, y a la energía radiante como una forma ultradiluida de la masa; las leyes de Laurent Lavoisier y de Robert Mayer, independientes en la ciencia clásica se funden en un principio más vasto: es la suma de la masa y de la energía la que se conserva en todas las transformaciones físico-químicas».¹⁴

A manera de cierre

La teoría especial de la relatividad (TER) debió someterse a las

pruebas experimentales como cualquier teoría física y esto le exigiría mucho más tiempo. Hoy, transcurridos cien años, se reconoce su validez en el campo de las altas energías. En el caso de las bajas velocidades la física de Newton nos suministra excelentes resultados.

Las matemáticas de la teoría einsteiniana fueron desarrolladas, en gran parte, de manera independiente por Poincaré, pero al parecer Einstein no las conoció y por esa razón nunca lo mencionó en sus artículos. Tampoco supo de las transformaciones de Lorentz¹⁵ por lo que su deducción de las transformaciones resulta original e intuitiva.

La diferencia de enfoques de la electrodinámica entre Einstein y Lorentz-Poincaré no logró ser apreciada por la mayoría de los físicos de aquellos años. En el fondo, la diferencia estructural era filosófica: Einstein negaba la existencia del éter, mientras que Poincaré y Lorentz sostenían su existencia objetiva. En cierta ocasión Lorentz se expresó al respecto así: «No puedo por menos de considerar que el éter, que puede ser la base de una teoría electromagnética con su energía y vibraciones, está dotado de cierto grado de sustancialidad, por muy diferente que pueda ser de toda la materia normal».¹⁶

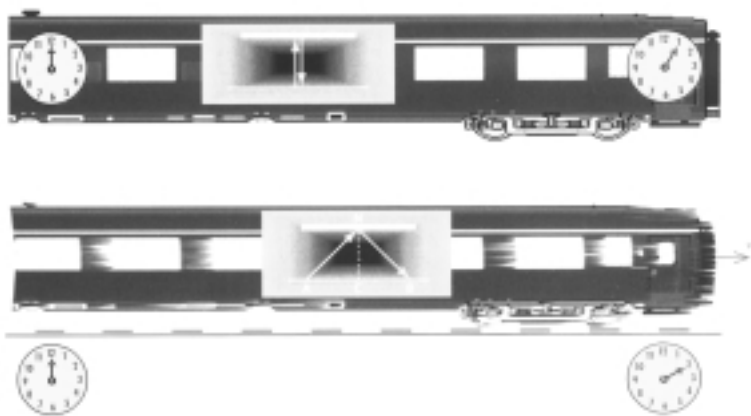
Considerando los importantes resultados del trabajo de Poincaré en el campo de la relatividad, cabe cuestionarse el porqué él no asumió públicamente la propuesta relativista.

Analizando los argumentos de discusión, se llega inevitablemente a una conclusión que podría responder el interrogante: Poincaré habría tenido que renunciar al éter, lo cual parece imposible pues siempre estuvo convencido de su existencia objetiva.

¹⁴ Ideas Revolucionarias en las Ciencias. Tomo III. Desiderio Papp. Editorial Universitaria.

¹⁵ Fue Poincaré quien las llamó transformaciones de Lorentz

¹⁶ Las Pasiones de Einstein. Dennis Overbye. Lumen 2005



La suposición de la existencia del éter no era, para él, una simple herramienta para la explicación de muchos fenómenos físicos. El éter soportaba su concepción física del mundo.

Según los historiadores, Poincaré nunca en sus escritos mencionó a Einstein. Alguna vez confesó a un colega que hacia 1910 le costaba «un tremendo» esfuerzo entender la relatividad. En un congreso celebrado en Gotinga aquel año, dijo que elegir entre la relatividad y la electrodinámica de Lorentz era cuestión de gustos. Su opinión nunca cambió.¹⁷

Posiblemente Peter Galison, en su libro «Relojes de Einstein, mapas de Poincaré», aclara un poco las cosas al referirse al primer y único encuentro (1911) entre estos dos grandes hombres de ciencia: «...La distancia entre los dos científicos era tan grande como su proximidad. Poincaré veía sus propias contribuciones como una forma de reparación del mundo, un ajuste, una transformación, una reescritura de la física lorentziana en una nueva mecánica que él veía con alborozo e inquietud. Para el joven Einstein la reparación tenía poco atractivo.

Demoler lo viejo era un placer».

La denominación de teoría de la relatividad fue propuesta en 1906 por Max Planck, el creador del cuántum. A Einstein, por su parte, le agradaba más llamarla teoría de los invariantes. ¿No resulta paradójico que la teoría de la relatividad se construya a partir de conjeturas absolutas?

Los resultados y las predicciones de la teoría llamaron la atención de millones de personas en el mundo. Surgieron entonces simpáticas interpretaciones y paradojas.¹⁹

La aparición de la relatividad, en 1905, tendría aún novedosas interpretaciones geométricas del nuevo absoluto: El espacio-tiempo. El espacio-tiempo heredado de la teoría especial ya no es euclideo.

Nació así una nueva geometría en el espacio-tiempo de la teoría especial. Minkowski, un antiguo profesor de Einstein, se ocuparía de la interpretación geométrica de la teoría especial y mostraría que la constancia de la velocidad de la luz se puede expresar en forma puramente geométrica.

Después de 1905, Einstein continuó en la oficina de patentes hasta

1908 cuando fue vinculado a la docencia en una universidad. «Estoy muy ocupado con mis clases, escribía Einstein a su amigo Besso, tanto que tengo menos tiempo *verdaderamente libre* que en Berna. Pero se aprende mucho enseñando».²⁰

El año 1905 fue muy especial, no sólo para la vida de Einstein, también para la historia de la física: «Annus Mirabilis» lo han llamado algunos. Porque, al igual que en 1666, cuando Newton estableció los fundamentos de la física y las matemáticas que revolucionaron la ciencia del siglo XVII, en 1905 Einstein realizó aportes fundamentales a la construcción de la representación física de la realidad y estableció nuevos paradigmas de la física en el siglo XX.

Referencias

- Armin Hermann. *Einstein en privado*. Temas de hoy. Biografías, 1997.
- Gerald Holton. *Einstein, historia y otras pasiones*. Taurus. Pensamiento, 1998.
- John Stachel (ed) *Einstein 1905: un año milagroso*. Dracontos. Crítica, 2001
- Luis de Broglie. *La física nueva y los cuantos*. Editorial Losada, 1965.

¹⁷ Henri Poincaré y la relatividad. Armand Borel

¹⁸ Albert Einstein. Albino arenas Gómez. Grandes Biografías. Edimat Libros. 1994. También se reseña en Razón y Revolución Alan Woods y Ted Grant.

¹⁹ La pseudo-paradoja de los gemelos fue propuesta por el físico francés Langevin y no se resuelve en el marco de la teoría especial de la relatividad.

²⁰ Albert Einstein Correspondencia con Besso. Pág. 82 Tusquets Editores. 1994